

음향 방출 측정법을 이용한 몰드변압기 열화진단

이상우*, 구경철*, 김성규*, 김인식**, 이동인*, 김기채*, 박원주*, 이광식*
 영남대학교 전기전자공학부*, 경일대학교 전기전자공학부**

Diagnosis of Insulation Deterioration in Cast Resin Transformer Using Method of AE Measurement

Sang-Woo Lee*, Kyung-Chul Gu*, Seung-Gyu Kim*, In-Sik Kim**, Dong-In Lee*, Ki-Chai Kim*, Won-Zoo Park*, Kwang-Sik Lee*
 School of Electrical and Electronic Engineering, Yeungnam University*, School of Electrical and Electronic Engineering, Kyungil University**

Abstract - In this paper, a frequency spectra of AE(acoustic emission) signals detected from the partial discharges of an epoxy resin void and a cast resin transformer in operating were analyzed to offer the proper frequency range of AE signals from the corona discharge for the purpose of AE sensor selection. From these results, a frequency spectra of AE signals emitted from the corona discharges in the void of an epoxy resin sample were about 190(kHz) to 220(kHz) by the FFT(fast fourier transform). A frequency spectra of AE signals emitted from a cast resin transformer with non-load were appeared to be downward of about 140(kHz) by the FFT, and then a frequency spectra of AE signals emitted from the above of cast resin transformer with load were appeared to increase from about 190(kHz) to 220(kHz) by the FFT.

1. 서 론

최근, 전력 수요의 증대에 따라 전력 계통 규모의 확대가 현실화되고 있으며, 전력 공급에 있어서 고신뢰성을 확보하기 위하여 전력용 변압기의 증설이 요구되고 있다. 또한 기설 전력용 변압기에 있어서 절연열화 진전 정도에 의한 수명을 예측·판별하여 교체 시기를 적절히 선정함으로써 전력 계통의 원활한 운용과 절연열화 예방 진단법의 합리화를 위한 안정성 확보 측면에서도 중요한 과제로 대두되고 있는 실정이다. 오늘날 전력용 몰드변압기는 에폭시수지의 고체 절연물을 많이 사용하고 있으며, 성형에 있어서 보이드가 존재하면 유전율의 차이에 의해 보이드내의 전계는 집중되어 부분방전이 발생되고 전기적인 트리가 성장하여 절연 파괴에 이르게 된다.[1] 이러한 전기적인 트리 형상은 절연물에서 수(μm)정도의 직경을 갖는 수지상의 미세한 판상이 성장하는 것으로 알려지고 있다.[3][4] 에폭시수지의 절연물에 있어서 절연열화에 의해 발생하는 탄성파는 물리적인 크기와 기계적인 압력에 의해 발생되며, 또한 탄성소성변형이나 미시적 균열이 생기기 때문이라고 알려지고 있다.[2]

운전중인 전력용 변압기에 있어서 부분방전이 발생하면 국부적인 열이나 음파가 발생되며, 음파는 주위 매질에 급격한 압축을 일으켜 소음과 구별되지 않으므로 측정에 있어서 곤란하다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 초음파 센서를 사용하여 검출하면 소음과 구별할 수 있다. 초음파 검출법을 사용한 부분방전 측정법의 장점으로는 방전 점의 위치 측정이 가능함으로써 이상 부위의 수리를 용이하게 할 수 있으며, 현장에서 비교적 외부 노이즈의 영향이 적기 때문에 신뢰성이 높을 뿐만 아니라 운전 상태에서 고장 여부를 검출할 수 있으므로 절연열화 과정을 조기에 검출하여 사고를 미연에 방지할 수 있다.[5]

따라서 본 연구에서는 초음파 검출법을 사용하여 에폭시수지 시료의 보이드방전에 의한 펄스전류와 초음파 신호 특성을 연구하였다. 그리고 에폭시수지 시료의 보이드방전에 있어서 초음파 신호 검출법을 최적화 하기 위하여 적절한 주파수 대역의 초음파 센서 선정이 필수적이므로 보이드방전에 의한 초음파 신호를 검출하여 주파수 스펙트럼으로 분석하였다. 또한 운전중인 전력용 몰드변압기에 있어서 무부하 및 부하인가에 따른 AE신호를 검출하여 주파수 스펙트럼으로 분석하였으며, 실험실 조건에서 검출한 데이터와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시료 및 전극 형성

본 실험에 사용된 에폭시수지 시료는 고온 경화를 주형 수지로 상온에서 액상인 비스페놀-A형인 에폭시수지를 사용하였으며, 경화제는 가사 시간이 길고 반응에 있어서 발열량이 적은 산무수물 계통의 METHPA를 사용하였다. 또한 고온 경화용 주형 수지인 에폭시수지(ARALDITE B41)를 100(%)으로 하였을 때 산무수물 계통의 경화제는(hardner HT 903) 35(%)로 배합하여 에폭시수지 시료를 형성하였다.

에폭시수지 시료의 크기는 30·40·6(mm)으로 하였으며, 에폭시수지 시료의 하단에는 직경 100.0(mm), 두께 2.0(mm)인 근사 로고스키형 황동제의 평판전극을 설치하였다. 침전극은 직경 4.0(mm)인 스테인레스강을 사용하였으며, 침의 선단 각은 약 30도, 선단곡률반경은 약 20(μm)으로 되도록 연마하였다.

2.2 실험장치 및 방법

효율적인 음향방출신호를 측정하기 위하여 AE 센서는 100(kHz)-1.5(MHz)의 주파수 대역을 사용하였으며, 센서의 주파수 이득은 1.5(MHz)까지는 거의 평탄한 이득 특성을 나타내고 있다. 수신 회로는 40(dB)의 이득을 갖는 Pre-amplifier(AE-912)를 사용하여 실험하였다.

에폭시수지 시료에 있어서 부분방전에 의한 음향방출 신호를 검출하기 위하여 디지털 오실로스코프(LeCroy 9350AL)를 사용하였다.

고전압 발생장치는 입력전압 220(V), 60(Hz), 출력전압 30(kV)인 코로나 측정 시스템을 사용하였다.

상용주파수 인가전압을 정밀하게 측정하기 위하여 분압비가 2000:1인 고압 프로브를 사용하였다.

상용주파수 인가전압은 16(kV) 및 20(kV)으로 하였으며, 인가전압방식은 승압속도 1.0(kV/s)로 16(kV) 또는 20(kV)까지 전압을 인가한 후 절연 파괴까지 일정하게 유지하였다.

운전중인 전력용 몰드변압기 외함 부분에 진공 그리스를 사용하여 광대역 AE 센서를 부착하고 부하 변화에 따른 AE신호를 측정하여 무부하에 있어서 전자력에 의한 노이즈와 비교·분석하였다.

무부하 측정법은 전력용 몰드변압기에 있어서 인입 전압 22.9(kV-Y)를 1차측에 인가하고, 2차측에는 무부하

인 경우 음향방출신호 및 전자력에 의한 노이즈를 검출하였다. 또한 부하 측정법은 전력용 몰드변압기에 있어서 2차측에 최대부하전력 500(kVA)의 10.6 [%]인 53(kVA)를 인가하였을 때 음향방출신호를 측정하여 분석하였다. 또한 무부하 및 부하에 있어서 AE 센서에 의하여 검출된 음향방출신호를 주파수 스펙트럼으로 각각 비교·분석하였다. 표1은 본 실험에 사용된 운전중인 전력용 몰드변압기의 사양을 나타내었다.

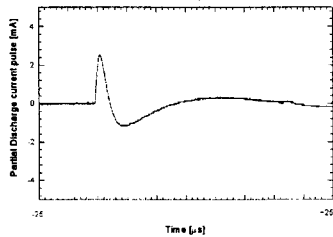
표 1 전력용 몰드변압기 사양
Table 1 Specification of power cast resin transformer

| Formalism | Standard |
|------------------------------|----------|
| TEMP. RISE | 80(°C) |
| FREQUENCY | 60(Hz) |
| RAT. CAPACITY | 500(kVA) |
| RAT. VOLT. PRIM. | 22900(V) |
| RAT. VOLT. SEC. | 380(V) |
| RAT. CURR. PRIM. | 12.6(A) |
| RAT. CURR. SEC. | 760(A) |
| BIL. PRIM. | 95(kV) |
| POWER FREQ. TEST VOLT. PRIM. | 50(kV) |
| POWER FREQ. TEST VOLT. SEC. | 3(kV) |
| TOTAL WT. | 1650(kg) |
| MFD. | 1996. 9 |

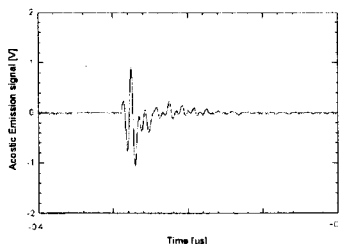
3. 실험결과 및 고찰

3.1 에폭시수지의 펄스전류와 음향방출신호 특성

그림1(a) 및 그림1(b)은 에폭시수지 시료의 상용주파수 인가전압 20(kV)인 경우 대표적인 보이드방전 펄스전류와 음향방출신호의 파형을 나타낸 것이다. 그림1(a)은 스코프의 시간 스케일을 5.0(μs/div)하였으며, 그림1(b)은 스코프의 시간 스케일을 0.2(μs/div)로 각각 확대하여 측정된 것이다. 에폭시수지 시료의 인공 보이드에 있어서 코로나가 발생하면 보이드내의 국부적인 발열에 의하여 부분방전 펄스전류가 발생하여 접지측 전선으로 흐른다. 또한 에폭시수지 시료의 침전극 선단 보이드에서 대향전극으로 향하여 수지형 트리가 진전하면서 방전 에너지는 확대된다. 그림1(a)과 같이 부분방전 펄스전류에 대한 그림1(b)의 음향방출신호는 PZT를 통하여 감쇠 형태로 발생하는 것으로 나타났으며, 음향방출신호의 잔향시간은 약 0.32(μs)로 나타났다.



(a) PD pulse current



(b) AE signal

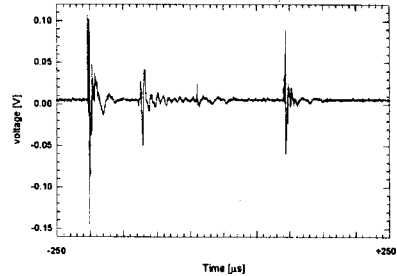
그림 1 부분방전 펄스전류와 AE신호 파형
Fig. 1 Waveform of AE signal and PD pulse current in epoxy resin

3.2 에폭시수지의 보이드방전에 의한 AE신호 주파수 스펙트럼

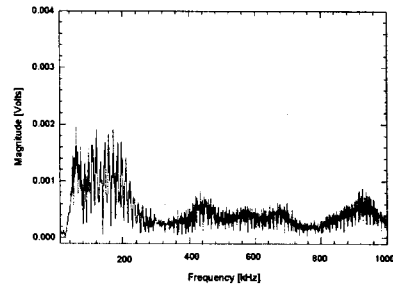
그림2(a)는 에폭시수지 시료의 인가전압 16(kV)인 경우 보이드방전에 의한 전기적인 트리가 성장하여 절연 파괴 부근인 열화 말기 영역에서 AE신호 파형을 측정하여 나타낸 것이다.

그림2(b)는 그림2(a)에서 검출된 AE신호 파형을 주파수 스펙트럼으로 분석한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 AE신호 파형은 시간 스케일을 50(μs/div)으로 검출하여 나타낸 것이다. 에폭시수지 시료의 보이드방전에 의한 열화 말기에 있어서 그림2(a)의 음향방출신호 파형을 그림2(b)와 같이 주파수 스펙트럼으로 분석한 결과 주파수 대역은 약 50-220(kHz)의 영역에서 양호한 것으로 나타났다.

수신 회로에 있어서 증폭기 이득 특성은 고역통과필터를 사용하였으므로 약 100(kHz)이하의 주파수 대역은 노이즈 성분이므로 보이드방전에 의한 주파수 대역은 약 100-220(kHz)의 영역에서 나타났다. 따라서 에폭시수지 시료에 있어서 보이드방전에 의한 음향방출신호의 주된 주파수 대역은 약 190-220(kHz) 영역에서 열화 초기부터 활성화되어 분포되는 것으로 관측되었다.



(a) AE signal



(b) Frequency spectrum

그림 2 AE신호의 주파수 스펙트럼
Fig. 2 Frequency spectrum of AE signal

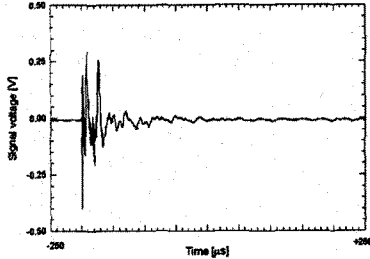
3.3 운전중인 몰드변압기에 있어서 음향방출신호의 주파수 스펙트럼

그림3(a)은 1차측에 22.9(kV-Y)를 인가하고, 2차측에는 무부하인 경우 외함 부분에 부착한 대표적인 AE신호를 측정하여 나타낸 것이다. 그림3(b)은 그림3(a)의 무부하에서 검출된 AE신호 파형을 주파수 스펙트럼으로 분석한 결과를 나타낸 것이다.

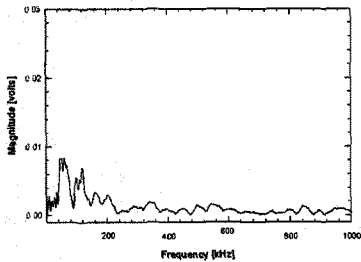
그림3(a)의 AE신호 파형을 그림3(b)과 같이 주파수 스펙트럼으로 분석한 결과 무부하에 있어서 대표적인 AE신호의 주파수 대역은 약 50-120(kHz)의 영역에서 검출되었다. 실험실 조건에서 에폭시수지 시료의 보이드

방전에 의한 AE신호의 주파수 스펙트럼은 주로 190-220[kHz]의 영역에 분포되는 것으로 나타났으므로 이 영역의 주파수 대역보다 매우 낮은 주파수 영역으로 나타났으며, 수신 회로에 있어서 증폭기의 이득 특성을 고려할 때 전자력에 의한 노이즈로 판명되었다.

따라서 몰드변압기의 무부하에 있어서 전자력에 의한 노이즈의 주파수 대역은 140[kHz]이하의 영역에서 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 영역에서 AE신호를 계수하는 것은 타당하지 않는 것으로 판명되었다.



(a) AE signal of A phase

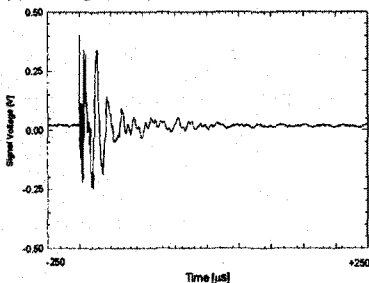


(b) Frequency spectrum of A phase

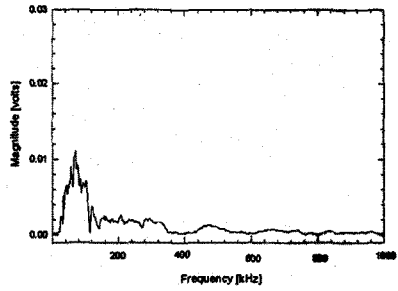
그림 3 무부하 AE신호 및 주파수 스펙트럼
Fig. 3 AE signal and frequency spectrum

그림4(a)는 최대부하전력 500[kVA]의 10.6(%)인 부하 53[kVA]를 사용한 경우 외함에 부착한 대표적인 AE신호를 측정하여 나타낸 것이다. 그림4(b)는 그림4(a)의 부하에서 검출된 AE신호 파형을 주파수 스펙트럼으로 분석한 결과를 나타낸 것이다.

그림4(a)의 AE신호 파형을 그림4(b)와 같이 주파수 스펙트럼으로 분석한 결과 최대부하전력의 10.6(%)인 부하전력에 있어서 주파수 대역은 약 50-120[kHz]의 영역에서 검출되었으나, 약 60[kHz]의 주파수 영역이 큰 것으로 나타났다. 그리고 약 50-120[kHz]의 주파수 영역에 비해 크기는 작고, 300[kHz]-1[MHz]의 주파수 영역에 비해 큰 180-240[kHz]의 주파수 영역을 부하 전력의 증가에 따라 변화 추이를 확인함으로써 절연열화 진단이 가능할 것으로 생각된다.



(a) AE signal of A phase



(b) Frequency spectrum of A phase

그림 4 부하 AE신호 및 주파수 스펙트럼
Fig. 4 AE signal and frequency spectrum

3. 결 론

본 연구에서는 에폭시수지 시료의 보이드방전과 운전 중인 몰드변압기에 있어서 음향방출신호를 주파수 스펙트럼으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 에폭시수지 시료의 보이드방전에 있어서 부분방전 필스전류에 의한 음향방출신호는 감쇠 형상으로 나타났으며, 잔향 시간은 약 0.32[μs]로 관측되었다.
- 2) 에폭시수지 시료에 있어서 보이드방전으로부터 트리 성장으로 인한 음향방출신호의 주파수 스펙트럼은 약 190-220[kHz]의 영역에 분포되었다.
- 3) 운전 중인 몰드변압기의 무부하에 있어서 전자력에 의한 노이즈는 약 140[kHz]이하의 영역으로 나타났다. 그리고 부하인가에 있어서 전자력에 의한 노이즈 성분을 제외하면 약 190-220[kHz]의 주파수 성분이 증가되었다. 따라서 부하인가에 있어서 약 190-220[kHz]의 주파수 성분을 추출하여 크기를 분석함으로써 절연열화의 진단 상태를 예방진단할 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. Mayoux and C. Laurent, "Contribution of Partial Discharges to Electrical Breakdown of Solid Insulating Materials", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp. 641-652, 1995.
- [2] J. H. Carpenter, J. S. Kresge and C. B. Musick, "Ultrasonic Corona Detector in Transformer", IEEE on Power Apparatus Syst., Vol. PAS-84, pp. 647-651, 1965.
- [3] "高分子絶縁材料におけるトリーイング劣化の基礎過程" 電気學會技術報告 第674號 pp. 1-70, 1998.
- [4] C. Mayoux and C. Laurent, "Contribution of Partial Discharges to Electrical Breakdown of Solid Insulating Materials", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp. 641-652, 1995.
- [5] 中村光一 외 3, "音響法による油入變壓器の放電点標定に關する實驗的檢討", T. IEE Japan, vol. 116-B, No. 10, pp. 1285-1291 1996.